



Die Erfindung betrifft einen Hochfrequenz-Generator für einen Plasma erzeugenden Verbraucher, mit einer Energiequelle für den Verbraucher.

Für die Spannungsversorgung von Plasma erzeugenden Verbrauchern, z. B. Plasmakammern zum Ätzen, Sputtern o. dgl. oder CO<sub>2</sub>-Leistungslasern, aber auch zur Spannungsversorgung von Spulen industrieller Heizungssysteme werden Hochfrequenz-Generatoren eingesetzt, die eine Ausgangsspannung mit einer Frequenz zwischen 50 kHz und 50 MHz liefern. Bei diesen Spannungsquellen handelt es sich um Leistungsgeneratoren mit einer Ausgangsleistung zwischen 0,5 und einigen KW, deren Ausgangsspannungen unter anderem eine der sogenannten ISM-Frequenzen (Industrial, Scientific, Medical Frequencies, 13,56 Mhz, 27,12 Mhz und 40,68 Mhz) aufweisen. Um eine optimale Leistungsübertragung vom Hochfrequenz-Generator zum Verbraucher zu erzielen, muß die Impedanz des Verbrauchers konjugiert komplex zum Innenwiderstand des Generators sein. Typischerweise beträgt der Innenwiderstand eines Hochfrequenz-Generators 50  $\Omega$ . Die von 50  $\Omega$  abweichende Lastimpedanz des Verbrauchers wird über ein Anpassungsnetzwerk (sogenannte Matchbox) transformiert (Leistungsanpassung). Das Anpassungsnetzwerk besteht aus passiven reaktiven Bauelementen, erzeugt also keine Verlustleistung (im Idealfall). Mit diesen Anpassungsnetzwerken ist jedoch eine Leistungsanpassung stets nur für eine einzige Frequenz möglich; ändert sich also die Frequenz, muß die Matchbox neu eingestellt werden. Ferner ist die Impedanz-Transformation mit den Anpassungsnetzwerken nicht linear. Da der Verbraucher (das Plasma) bezüglich seiner Impedanz nicht konstant ist, ist optimale Leistungsübertragung nicht möglich. Die Nachstellung der Matchbox an die jeweilige Lastimpedanz ist schaltungstechnisch kompliziert und aufwendig. Hierzu ist nämlich ein Sensor bzw. Richtkoppler erforderlich, der die vom Verbraucher reflektierte Welle erfaßt und über ein dieser Welle entsprechendes Signal die passiven Bauelemente der Matchbox nachstellt.

Aus DE 33 37 811 A1 ist ein Hochfrequenz-Generator bekannt, der eine Gleichspannungs-Energiequelle aufweist, deren Ausgang mit einem steuerbaren elektronischen Schalter verbunden ist. Die durch den Schalter ein- und ausgeschaltete Gleichspannung wird einer Energiezwischenspeicher- und Übertragungsvorrichtung zugeführt, deren Ausgang mit einem Plasma erzeugenden Verbraucher verbunden ist. Der elektronische Schalter wird impulsartig von einer Steuerschaltung angesteuert, um die Ausgangsspannung der Energiequelle für kurze Zeit der Energiezwischenspeicher- und Übertragungsvorrichtung (also dem Transformator) zuzuführen. An dem Ausgang des Transformators entsteht infolge des Eingangsspannungsimpulses ein Hochspannungsausgangsimpuls zum Betreiben des Plasma erzeugenden Verbrauchers. Mit dem bekannten Generator lassen sich hochfrequente Hochspannungsimpulse, d. h. Impulse im Mhz-Bereich nicht erzeugen, da der Transformator bei derartigen Eingangsfrequenzen an seinem Ausgang infolge seines ohmschen und seines induktiven sowie kapazitiven Widerstandes Hochspannungsimpulse mit derartigen Frequenzen nicht mehr übertragen bzw. erzeugen kann. Darüber hinaus ist der bekannte Hochspannungsimpulsgenerator nicht leistungsangepaßt, weshalb nur ein Bruchteil der von der Energiequelle zur Verfügung gestellten elektrischen Leistung

zum Plasma erzeugenden Verbraucher gelangt.

Aus R. Paul: "Elektronische Halbleiterbauelemente", Verlag B.C. Teubner Stuttgart (1986), S. 338 bis 347, ist es grundsätzlich bekannt, mit Leistungs-(POWER-) MOSFET-Transistoren Schaltfrequenzen von einigen 100 KHz erzielen zu können.

In dem Artikel "HF-Generator mit Leistungs-MOSFETs", Dipl.-Ing. (FH) Ottmar Failing, Elektronik 15, S. 61 bis 65, 26.07.1985, ist ein HF-Generator mit einer Ausgangsleistung von mehreren hundert Watt im Frequenzbereich 500 KHz bis 2 Mhz beschrieben. Mittels eines Serienschwingkreises wird bei diesem bekannten HF-Generator die HF-Energie zur Ionisierung eines Plasmas eingekoppelt. Der HF-Generator verfügt also über ein Anpassungsnetzwerk (in Form des Schwingkreises), das zwischen die POWER-MOSFET-Endstufe und die Last (Plasma) geschaltet ist.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Hochfrequenz-Generator für einen Plasma erzeugenden Verbraucher zu schaffen, bei dem ohne Zwischenschaltung eines Anpassungsnetzwerkes nahezu die volle elektrische Leistung ohne das Erfordernis einer Leistungsanpassung zum Verbraucher übertragen wird.

Zur Lösung dieser Aufgabe wird mit der Erfindung ein Hochfrequenz-Generator mit den Merkmalen des Anspruchs 1 vorgeschlagen; vorteilhafte Weiterbildungen davon sind jeweils in den Unteransprüchen angegeben.

Nach der Erfindung ist sinngemäß vorgesehen, daß der Plasma erzeugende Verbraucher ohne Zwischenschalten eines Leistungsanpassungsnetzwerkes direkt mit der die Leistung zur Verfügung stellenden Gleichspannungs-Energiequelle und einem durch ein hochfrequentes Rechteck-Steuersignal einer Steuerschaltung gesteuerten elektronischen Schalter mit dualem Schaltverhalten verbindbar ist und daß die Energiequelle selbst die zum Betreiben des Plasma erzeugenden Verbrauchers benötigte Betriebsspannung liefert, ohne daß eine Transformation der durch den Schalter abwechselnd ein- und ausgeschalteten Ausgangsspannung der Energiequelle vor oder hinter dem Schalter erforderlich ist.

Die der Erfindung zugrundeliegende Idee besteht also darin, den Plasma erzeugenden Verbraucher mit einer (idealen) Rechteck-Spannung mit gegebenenfalls einstellbarem Ein/Aus-Verhältnis zu betreiben. Diese Rechteck-Hochspannung weist eine extrem hohe Frequenz von beispielsweise 1 Mhz bis 100 Mhz auf. Der Vorteil des Betriebes eines Plasma erzeugenden Verbrauchers mit einer hochfrequenten Rechteck-Spannung besteht darin, daß nunmehr eine Leistungsanpassung zwischen der ein- und ausgeschalteten Ausgangsspannung und dem Verbraucher nicht erforderlich ist. Der Grund dafür ist wiederum in dem Umstand zu sehen, daß der Innenwiderstand des Hochfrequenz-Rechteckgenerators äußerst gering ist, da er ausschließlich durch den elektrischen Widerstand der Gleichspannungs-Energiequelle und des Schalters im eingeschalteten Zustand bestimmt ist. Bei einem Hochfrequenz-Spannungsgenerator mit (im Idealfall) dem Innenwiderstand von 0  $\Omega$  ist jedoch eine Leistungsanpassung zu einem angeschlossenen Verbraucher nicht mehr erforderlich. Daher kann bei dem erfindungsgemäßen Generator, dessen Innenwiderstand deutlich, d. h. um eine Größenordnung unter den typischen 50  $\Omega$  liegt, praktisch auf ein Leistungsanpassungsnetzwerk verzichtet werden, wobei trotzdem nahezu die volle Leistung zum Verbraucher übertragen wird.

muß die Gate-Spannung wesentlich niedriger sein, als in dem Fall, in dem der Verbraucher 16 zwischen Masse und MOSFET-Transistor 18 geschaltet ist.

Der Hochfrequenz-Generator 10 liefert eine Ausgangsleistung, die zwischen 0,5 und einigen kW liegt. Die Versorgungsspannung  $+U_B$  beträgt einige 100 Volt, so daß der MOSFET-Transistor 18 Ströme in der Größenordnung von 10 Ampere und mehr ein- und ausschalten muß. Zu diesem Zweck muß der MOSFET-Transistor 18 als Leistungstransistor ausgebildet sein. Die für diese Zwecke erforderlichen Transistoren sind am Markt erhältlich. Diese Leistungstransistoren weisen eine extrem geringe Eigeninduktivität auf, die jedoch noch zu groß ist, um Ströme von etlichen Ampere im ns-Bereich zu schalten. Um die Eigeninduktivität weiter herabzusetzen, sind die Drain-, Source- und Gate-Elektroden des MOSFET-Transistors 18 über jeweils mehrere Bonddrähte mit den entsprechenden Transistorgehäuse-Anschlüssen verbunden. Ferner sind an der Source-Elektrode 24 der Steuer- und Laststromkreis aufgeteilt, d. h. der MOSFET-Transistor 18 weist eine dem Steuerstromkreis zugeordnete Source-Elektrode und eine dem Verbraucherstromkreis zugeordnete Source-Elektrode auf. Ferner weist der MOSFET-Transistor 18 eine sogenannte Stripline-Low-Impedanz-Struktur und eine induktionsverhindernde interne Leitungsführung auf.

Als elektrische Verbindung zwischen dem MOSFET-Transistor 18 und der Last 16 dient der elektrische Leiter 20, der, da ein Anpassungsnetzwerk nicht erforderlich ist, weder eine ein- noch eine beidseitige Anpassung aufweist. Vorteilhafterweise ist der Schalter integraler Bestandteil des Verbrauchers.

Die Verbindung des in Stripline-Low-Impedanz-Struktur ausgebildeten MOSFET-Transistors 13 mit dem Verbraucher 16 einerseits und der Steuerschaltung 28 andererseits ist in Fig. 2 dargestellt. Das Gehäuse 17 des MOSFET-Transistors 18 weist einen Gate-Anschluß 26' mit Stripline geringer Impedanz auf, der elektrisch mit der das Hochfrequenz-Ansteuersignal für den MOSFET-Transistor 18 liefernden Steuerschaltung 28 verbunden ist. Ferner ist am Gehäuse 17 ein Drain-Anschluß 22' mit Stripline geringer Impedanz vorgesehen, an dem über den elektrischen Leiter 20 der Verbraucher 16 angeschlossen ist. Der andere Anschluß des Verbrauchers 16 ist, wie auch in Fig. 1 gezeigt, mit dem positiven Spannungspotential  $+U_B$  verbunden, das über den Kondensator 30 gegen Masse abgeblockt ist. Die Source-Elektrode 24 des MOSFET-Transistors 18 ist in eine Steuerstromkreis- und eine Verbraucherstromkreis-Elektrode aufgeteilt. Am Gehäuse 17 sind zwei "gateseitige" Source-Anschlüsse 25, 25' vorgesehen, die beide mit der dem Steuerstromkreis zugeordneten gateseitigen Source-Elektrode verbunden sind, und zwei "drainseitige" Source-Anschlüsse 23, 23' vorgesehen, die mit der dem Verbraucherstromkreis zugeordneten Source-Elektrode verbunden sind. Sämtliche Source-Anschlüsse 23, 23', 25, 25' sind an Masse gelegt, wobei die gateseitigen Source-Anschlüsse 25, 25' zusätzlich mit der Steuerschaltung 28 (genauer gesagt mit deren Massepotential) verbunden sind. Auf der den Drain-Anschluß 22' mit dem Verbraucher 16 verbindenden Leitung 20 liegt die Hochleistungs- und Hochfrequenz-Rechteckversorgungsspannung an, was in Fig. 2 entsprechend angedeutet ist.

Infolge der extrem geringen Anstiegs- und Abfallzeiten des Rechteck-Steuersignals der Steuerschaltung 28 befindet sich der MOSFET-Transistor 18 entweder im

(leitenden) EIN-Zustand oder im (sperrenden) AUS-Zustand. Die Zeiträume, in denen sich der MOSFET-Transistor 18 in seinen Übergangs- oder Teilleitzuständen befindet, sind derart gering, daß die in diesen Zuständen auftretenden Verlustleistungen vernachlässigt werden können. Ebenso vernachlässigbar sind die durch die internen MOSFET-Kapazitäten bedingten Verlustleistungen beim Schaltprozeß selbst. Im EIN-Zustand erzeugt der MOSFET-Transistor 18 also die Verlustleistung  $I^2 R_{DS(on)}$ , wobei  $I$  den Strom und  $R_{DS(on)}$  den Widerstand des MOSFET-Transistors 18 zwischen dessen Drain- und Source-Elektroden bezeichnet. Durch Verwendung eines genügend großflächigen Power-MOSFET-Transistors kann der Widerstand  $R_{DS(on)}$  bis auf Werte im Bereich von 0,2 bis 1  $\Omega$  reduziert werden. Damit ist der Innenwiderstand des MOSFET-Transistors 18 deutlich geringer als der Innenwiderstand herkömmlicher Hochfrequenz-Generatoren, aber auch deutlich geringer als der Widerstand industrieller Plasma- und Laserverbraucher. Der Innenwiderstand des Hochfrequenz-Generators 10 gemäß Fig. 1 setzt sich zusammen aus dem Innenwiderstand 14 der Gleichspannungsquelle 12 und dem Widerstand  $R_{DS(on)}$ . Der Innenwiderstand 14 einer Gleichspannungsquelle ist aber relativ gering, so daß der Hochfrequenz-Generator 10 insgesamt einen nur geringen Innenwiderstand aufweist. Aufgrund des geringen Innenwiderstandes, insbesondere in Bezug auf den Widerstand bzw. die Impedanz der mit dem Hochfrequenz-Generator 10 betriebenen Verbraucher ist eine Leistungsanpassung nicht erforderlich. Denn auch ohne diese Leistungsanpassung ergibt sich bei dem Hochfrequenz-Generator 10 eine sehr gute Leistungsübertragung zum Verbraucher 16, da praktisch keine Verlustleistung an dem MOSFET-Transistor 18 entsteht.

Ein zweites Ausführungsbeispiel eines Hochfrequenz-Generators 31 ist in Fig. 3 dargestellt. Dieser Hochfrequenz-Generator 31 weist eine Gleichspannungsquelle 32 mit einem Innenwiderstand 34 auf. Die Gleichspannungsquelle liefert an ihren beiden Klemmen gegenüber Masse die positive und die negative Versorgungsspannung  $+U_B$  bzw.  $-U_B$ . Beide Versorgungsspannungspotentiale sind über jeweils einen Kondensator 35 gegen Masse abgeblockt. Zwischen den beiden Gleichspannungspotentialen der Gleichstromquelle 32 sind zwei elektronische Schalter in Form der MOSFET-Transistoren 36 und 38 geschaltet. Die Verbindungsleitung 40 für die beiden MOSFET-Transistoren 36, 38 ist über den Verbraucher 42 mit Masse verbunden. Die positive Versorgungsspannung  $+U_B$  liegt an der Drain-Elektrode 44 des MOSFET-Transistors 36 an, dessen Source-Elektrode 46 über die Leitung 40 mit der Drain-Elektrode 48 des MOSFET-Transistors 38 verbunden ist. An der Source-Elektrode 50 des MOSFET-Transistors 38 liegt die negative Versorgungsspannung  $-U_B$ .

Die Gate-Elektroden 52, 54 der MOSFET-Transistoren 36, 38 sind mit einer Steuerschaltung 56 elektrisch verbunden, die zwei um 180° phasenverschobene Rechteck-Ausgangssignale zum Ansteuern der beiden MOSFET-Transistoren 36, 38 im Gegentaktbetrieb erzeugt. Über die beiden MOSFET-Transistoren 36, 38, die beide als EIN-/AUS-Schalter betrieben werden, wird die Last 42 abwechselnd mit der positiven und der negativen Versorgungsspannung  $+U_B$  bzw.  $-U_B$  beaufschlagt. Die Eigenschaften der MOSFET-Transistoren 36, 38 und der Steuerschaltung 56 entsprechen dem MOSFET-Transistor 18 und der Steuerschaltung 28 des

im Zusammenhang mit Fig. 1 beschriebenen Hochfrequenz-Generators 10.

# Patentansprüche

1. Hochfrequenz-Generator für einen im MHz-Bereich zu betreibenden plasmaerzeugenden Verbraucher (16; 42), mit einer Gleichspannungs-Energiequelle (12; 32) für den Verbraucher (16; 42) und mindestens einem durch ein hochfrequentes Rechteck-Steuersignal einer Steuerschaltung (28) gesteuerten elektronischen Schalter, wobei
  - die Schaltung mindestens einen POWER-MOSFET-Transistor (18) aufweist, der interne Drain-, Source- und Gate-Elektroden aufweist, welche über jeweils mehrere Bonddrähte mit externen Drain-, Source- und Gate-Anschlüssen (22', 23, 23', 25, 25', 26') eines Gehäuses (17) des MOSFET-Transistors (18) eigeninduktivitätsvermindernd verbunden sind,
  - das Gehäuse (17) des MOSFET-Transistors (18) zwei mit dem Verbraucher (16; 42) verbindbare gateseitige Source-Anschlüsse (25, 25') und zwei mit der Steuerschaltung (28) verbundene drainseitige Source-Anschlüsse (23, 23') aufweist, wobei die gateseitigen und die drainseitigen Source-Anschlüsse (25, 25', 23, 23') über getrennte Bonddrähte mit den Source-Elektroden des MOSFET-Transistors (18) verbunden sind,
  - die Anschlüsse (22', 23, 23', 25, 25', 26') des Gehäuses (17) des MOSFET-Transistors (18) jeweils Stripline-Struktur aufweisen,
  - der plasmaerzeugende Verbraucher (16; 42) direkt ohne Zwischenschaltung eines Leistungsanpassungsnetzwerkes mit der Energiequelle (12; 32) und den Source- und Drain-Anschlüssen (23, 23', 22) verbindbar ist und
  - die Energiequelle (12; 32) selbst die zum Betreiben des plasmaerzeugenden Verbrauchers (16; 42) benötigte Betriebsspannung liefert, ohne daß eine Transformation der durch den MOSFET-Transistor (18) abwechselnd ein- und ausgeschalteten Ausgangsspannung der Energiequelle (12; 32) erforderlich ist.
2. Generator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Rechteck-Steuersignal eine Frequenz zwischen 1 und 100 MHz aufweist.
3. Generator nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz zwischen 1 MHz und 50 MHz bei Anstiegs- sowie Abfallzeiten zwischen 2 ns und 5 ns beträgt.
4. Generator nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Energiequelle (12; 32) und der Schalter (18) jeweils zwischen einem gemeinsamen Potential und einer Anschlußklemme des plasmaerzeugenden Verbrauchers (16; 42) geschaltet sind.
5. Generator nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Energiequelle (32) und Verbraucher (42) zwei in einer Halbbrücken-Schaltung angeordnete im Gegentaktbetrieb ansteuerbare POWER-MOSFET-Transistoren (36, 38) geschaltet sind.
6. Generator nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Energiequelle und Verbraucher vier in Vollbrücken-Schaltung angeordnete, paarweise im Gegentaktbetrieb

ansteuerbare POWER-MOSFET-Transistoren geschaltet sind.

7. Verfahren zum Betreiben eines plasmaerzeugenden Verbrauchers, bei dem an den Verbraucher (16, 42) mittels eines Hochfrequenz-Generators nach einem der vorhergehenden Ansprüche eine Rechteck-Betriebsspannung im kV-Bereich mit einer Frequenz von 1 MHz bis 100 MHz angelegt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

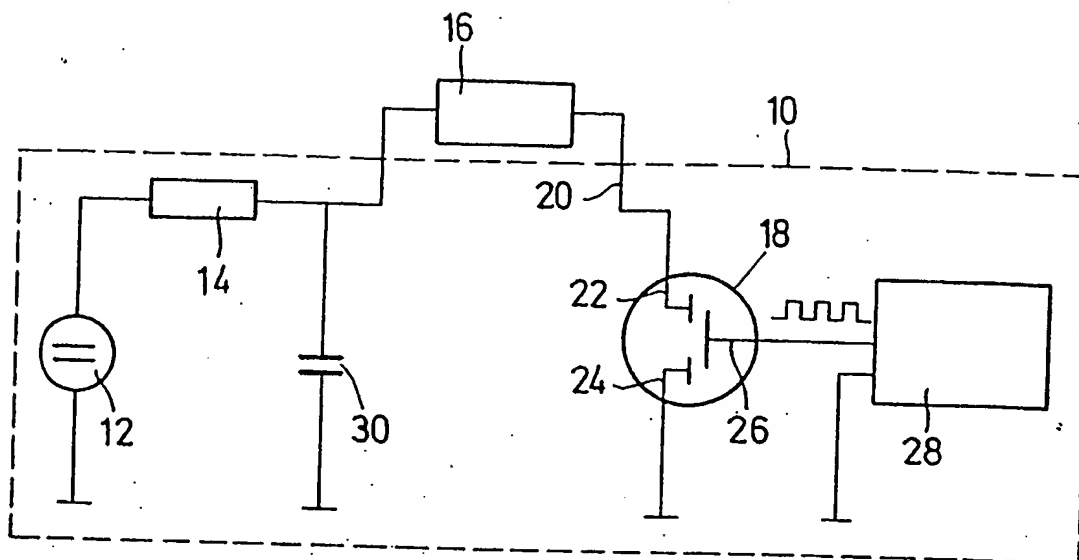


FIG. 1

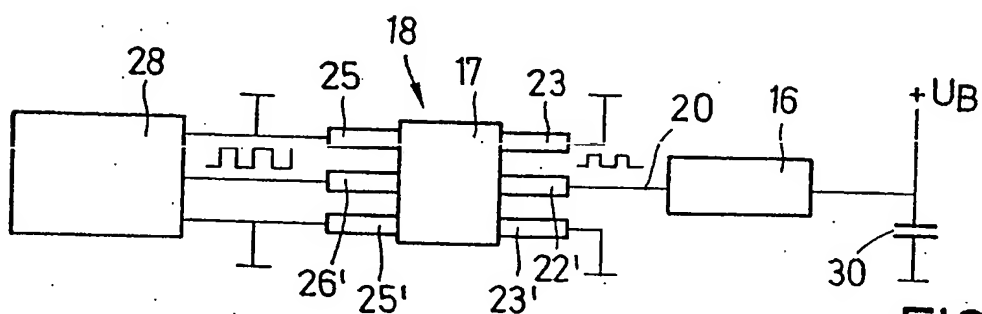


FIG. 2

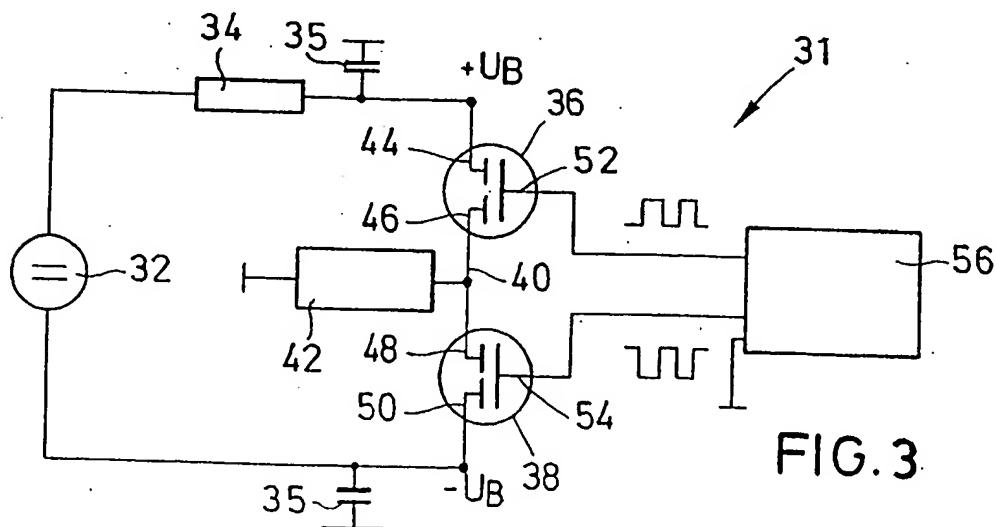


FIG. 3